

· 光电器件与材料 ·

## 高品质因数的微波光子滤波器分析

安丽婧, 裴 丽, 祁春慧, 高 嵩, 李卓轩

(北京交通大学, 光波技术研究所, 全光网与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘 要:**微波光子滤波器是微波通信中的关键部分. 其一项重要指标是高品质因数  $Q$ , 其大小决定了滤波器的选频性能.  $Q$  值越高, 选频性能越好. 影响  $Q$  值的因素有很多, 如滤波器的抽头系数, 自由频程  $FSR$  等. 对几种典型高  $Q$  值微波光子滤波器的结构性能进行了分析, 并得到了获得高品质因数  $Q$  值的有效方法.

**关键词:**微波光子滤波器;  $Q$  值; IIR; FIR

中图分类号: TN713<sup>+</sup>.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)04-0042-04

## Analysis of High $Q$ Microwave Optic Filter

AN Li-jing, PEI Li, QI Chun-hui, GAO Song, LI Zhuo-xuan

(Key Lab. of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of the Education Ministry, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** With the increasing demand of communication, the microwave communication is attracting more and more attention. The MPF (Microwave Photonic Filter) is one of the most important parts in the research field.  $Q$  value is an important term to MPF. It determines the performance of selective frequency. The higher of  $Q$  value, the better of the selective frequency. There are many factors affecting  $Q$  value, such as the coefficients of filter and  $FSR$ . The characteristics of structure in MPF were analyzed and the effective way to obtain the high  $Q$  value was acquired.

**Key words:** MPF (Microwave Photonic Fiber);  $Q$  Value; IIR (Infinite Impulse Response); FIR (Finite Impulse Response)

随着大容量信息技术需求的发展, 信息的传输要求系统有更大的容量, 更高的频率利用率, 更小的衰减及更低的成本. 微波通信有传输成本低和频率利用率高的优点, 同时, 光纤通信可以实现多路复用, 并且有抗电磁干扰和低损耗的优点. 为了同时利用微波学和光学 2 种研究学科的优点, 一种新的学科——微波光子学应运而生.

ROF (Radio - Over - Fiber) 是微波光子学中一项很重要的技术, 它利用光纤代替大气作为传输媒质来传输射频信号. 近年来的研究成果表明, 光子

滤波器有抗电磁干扰, 高带宽, 低成本等优点, 受到了广泛的关注. 高  $Q$  值 (High Quality Value, 即高品质因数) 成为微波光子滤波器研究的热点之一. 为了达到理想的  $Q$  值, 增强选频特性, 研究人员已经提出了多种解决方法, 基于 IIR 的光子滤波器已经达到比较高的  $Q$  值<sup>[1-3]</sup>. 一些研究机构早期提出的基于无源结构的滤波器的  $Q$  值是有限的, 只能通过提高频率响应中  $FSR$  (Free Spectrum Range, 自由频程) 内的频谱峰个数, 此种方法可以通过增加滤波器的抽头数量来解决, 文献[4]中就使用了多达 30 个

收稿日期: 2010-06-11

基金项目: 国家自然科学基金 (60771008, 60837002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2009YJS010); 留学回国人员基金 (教外 2008890) 和教育部博士点基金 (200800040002)

作者简介: 安丽婧 (1986-), 女, 硕士, 主要研究方向为光通信与移动通信.

光纤光栅组成的光栅阵列来实现较高  $Q$  值的滤波器.同时,科学家研发的多层结构滤波器<sup>[5,6]</sup>可以使  $Q$  值达到 983<sup>[5]</sup>.此后,研究人员相继提出了基于有源结构的高  $Q$  值光子滤波器,也可以达到较高的  $Q$  值<sup>[4]</sup>.最近几年,出现了有源结构与无源结构相结合的滤波器结构<sup>[7]</sup>,  $Q$  值可以达到 801.

文中主要对微波光子滤波器的  $Q$  值进行介绍和理论分析,然后介绍了几种高品质因数微波光子滤波器的实现方法.

## 1 微波光子滤波器品质因数

### 1.1 FIR 和 IIR 滤波器

类似于数字滤波器,光纤通信使用的滤波器也可以分为 IIR(Infinite Impulse Response)滤波器和 FIR(Finite Impulse Response)滤波器,即无限脉冲响应数字滤波器和有限脉冲响应数字滤波器.

FIR 滤波器的时域表达式如下

$$\sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k) = y(n)$$

IIR 滤波器的时域表达式如下

$$\sum_{m=0}^M a_m x(t-mT) + \sum_{n=1}^N b_n y(t-nT) = y(t) \quad (1)$$

式(1)是由两部分相加构成的:第一部分  $\sum_{m=0}^M a_m x(t-mT)$  是一个对输入  $x(t)$  的延时链结构,每节延时  $T$  后抽头加权相加;第二部分  $\sum_{n=1}^N b_n y(t-nT)$  是一个对输出  $y(t)$  的延时链结构,每节延时  $T$  后

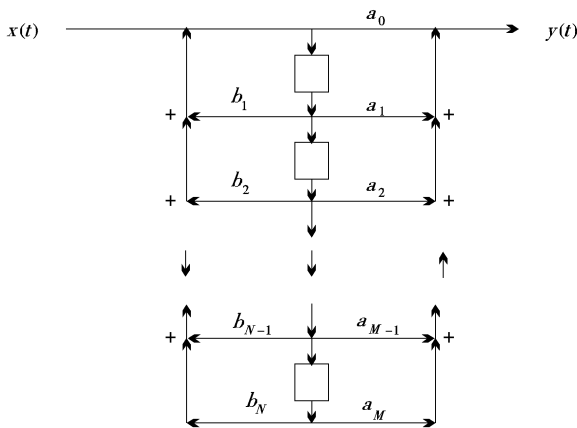


图 1 IIR 滤波器结构图

抽头也加权相加.因此,这是一个反馈型的网络结构.IIR 滤波器的系统框图如图 1 所示,其中,  $x(t)$  为系统的输入;  $y(t)$  为系统的输出;  $T$  为系统每节的延时时间;  $a_0, \dots, a_M$  是系统正向通路的加权系数,  $b_1, \dots, b_N$  是系统反向通路的加权系数.

将式(1)进行傅里叶变换,可以得到频域的传输公式

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} = \frac{\sum_{m=0}^M a_m e^{-jm\omega T}}{1 - \sum_{n=1}^N b_n e^{-jn\omega T}} \quad (2)$$

同样,可以得到 IIR 滤波器的  $z$  域传输函数

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{m=0}^M a_m (z^{-1})^m}{1 - \sum_{n=1}^N b_n (z^{-1})^n}$$

### 1.2 品质因数 $Q$ (Quality Value)

品质因数  $Q$  的意义是衡量了滤波器的选频特性,  $Q$  值越大,滤波器的选频性能越好,能够较准确地滤出需要的频率.  $Q$  值的定义式如下

$$Q = \frac{FSR}{\Delta f_{-3dB}} \quad (3)$$

其中,  $FSR$  为滤波器的自由频程,与滤波器的延迟时间有关,也就是滤波的周期长度.在光子滤波器中,根据延迟结构的不同,  $FSR$  与光栅之间的距离或者是光纤环的长度有关.光纤带宽用  $f_{-3dB}$  表示,对应的是频率响应的  $H(f)$  幅度下降一半时的频率,  $\Delta f_{-3dB}$  对应的是其频谱宽度.从式(3)中可以看出,  $FSR$  越大,或者  $\Delta f_{-3dB}$  越小,滤波器的频谱越窄,对应的  $Q$  值越大,选频特性越好.

## 2 几种高品质因数的微波光子滤波器的方法

近几年,很多高  $Q$  值微波光子滤波器的方法频频出现在我们的视野中.归纳起来,实现方法大多数是基于以下 3 种:(1)微波光子滤波器中使用有源光纤或者在滤波器中加入放大器;(2)利用光纤环作为延迟线达到滤波的目的;(3)利用 MZ 滤波器,构成有源结构与无源结构串联的微波光子滤波器.

### 2.1 利用掺饵光纤的微波光子滤波器

微波光子滤波器设计的基础是信号在传输过程中不断的产生延迟,在接收端,不同的时延信号合并,

然后经过光电检测.图 2 所示是一种典型的高 Q 值微波光子滤波器结构,其中, R1 和 R2 分别代表了光栅 FBG1 和光栅 FBG2 的反射率.当光栅 FBG1 的反射率为 50%,光栅 FBG2 的反射率为 100% 时,被调制后的信号经过 FBG1 后,一半信号被 FBG1 反射回来,另一半信号透射后经过掺铒光纤放大器 EDFA,被 FBG2 全部反射到 FBG 对中.反射光经过光纤环形器后到达光电探测器,透射光到达 FBG2 后全部被反射,经过光纤延迟线 L 后,又有一部分透射,一部分反射,依次反复.因此,每次经过环形器后到达光电探测器的信号都有 2L 的路程差,这样就产生了等间隔的时间延迟.这样,信号被向前和向后不断的反射和延迟形成了大量的脉冲响应的抽头,并且不同抽头之间的时间时延是相同的.

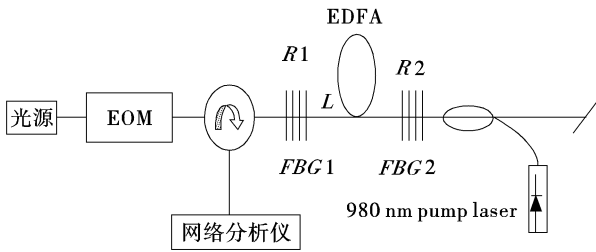


图 2 利用掺铒光纤的微波光子滤波器

图 2 所示滤波器属于 IIR 滤波器<sup>[4]</sup>.它在光栅之间使用了掺铒光纤,引入了泵浦源,属于有源微波光子滤波器类型.由传输函数可以看出,增大滤波器增益  $g$  可以增大  $z$  域的响应,进而增加  $Q$  值.  $G$  越大,其  $Q$  值越大,随着  $Q$  的减小,频谱的带宽增加,选频性能变差.光栅对使得信号在光栅中间不断的被反射、放大,由于每个信号冲激之间的路程差相同,因此可以连续产生等间隔的频谱.通过其实验仿真表明,  $Q$  值可以达到 325.

这种类型滤波器的优点是结构简单,比较容易实现.近期有很多的微波光子滤波器结构都是基于这种结构进行改进的.但是在信号反复振荡与光栅对之间的时候,会对信号造成衰减,这就需要通过提高放大器的性能.并且,由于掺铒光纤的长度受到了一定的限制,该滤波器不能实现可调谐性.

## 2.2 利用光纤环延迟线的微波光子滤波器

### (1)在光纤环中加入 EDFA

图 3 所示的微波光子滤波器的结构虽然很简单,但是可以达到很高的  $Q$  值.结构中使用了光纤环作为延迟线,同时在光纤环中加入了 EDFA,用来

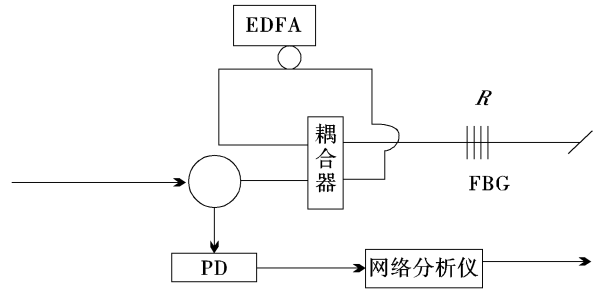


图 3 利用光纤环延迟线和 EDFA 的高 Q 值微波光子滤波器结构

补偿延迟造成的损耗<sup>[9]</sup>.利用光纤光栅和光环形器,延迟信号由于经过的路径距离不同造成了不同的时延,不同时延的信号组成了不同的抽头.信号光经过 3 dB 耦合器,进行合波与分波,具体路径为:第一种,信号光经过耦合器,到达光栅后,全部反射回到耦合器;第二种,包含 2 个路径的合成,一条路径为信号光逆时针经过光纤环一次后,通过光栅反射回到耦合器,另一条路径为通过光栅反射后,顺时针经过光纤环一次,再会到耦合器;第三种,包含 3 个路径的合成,一条路径为顺时针经过光纤环 2 次,第二条路径为逆时针经过光纤环 2 次,第三条路径为顺时针和逆时针经过光纤环各一次, ..., 依次类推.如果设经过光纤环一次的时延为  $T$ ,那么,返回到耦合器的信号是由延迟信号为  $0, T, 2T, 3T, \dots, (n-1)T$  叠加构成.光纤环作为延迟线的滤波器产生的频谱峰比较陡峭,为获得较高的  $Q$  值奠定了很好的基础.因此,可以在一个光纤环作为延迟线的基础上,再串联一个光纤环,提高滤波特性和  $Q$  值.也可以将有源光纤环和一个无源滤波器串联,提高选频特性.

### (2)在光纤环中加入半导体光放大器

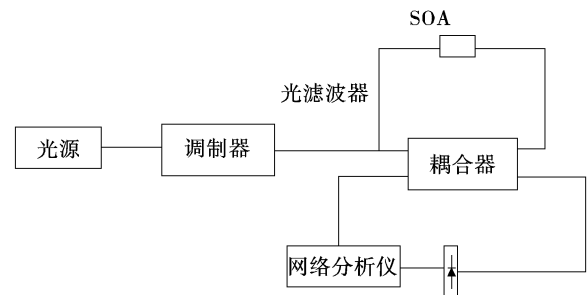


图 4 利用光纤环和半导体光放大器的微波光子滤波器结构

图 4 中,SOA 为半导体光放大器,光纤环中串联一个光滤波器是为增大微波光子滤波器的  $Q$  值.与图 3 相比较,环路和耦合器的连接方式是不同的,

因此,信号光的路径不同,构成的滤波器传输函数也不同.信号光具体路径为:第一路直接输出,第二路绕环一周输出,第三路绕环两周输出,⋯,相邻两路信号延时时间  $T$ .文献[12]中,作者针对 SOA 的抽运电流和输入光功率  $P$  对滤波器  $Q$  值的影响做了具体分析.

以上 2 种结构都是单个光纤环作为延迟线的微波光子滤波器的结构.

### 2.3 利用 MZ 滤波器构成的微波光子滤波器

#### (1) Mach-Zehnder 干涉滤波器原理

Mach-Zehnder 干涉滤波器,由 2 个 3 dB 耦合器串联成,干涉仪的两臂长度差为  $\Delta L$ ,如图 5a 所示.

经过第一个 3 dB 耦合器后,光被平均分配到滤波器的两臂,但是由于两臂的长度有差,所以经过两臂传输后的光产生了相位差,  $\Delta\varphi = \frac{2\pi f(\Delta L)n}{c}$  假设三级的 Mach-Zehnder 干涉滤波器的两臂差分别为  $\Delta L_1, \Delta L_2, \Delta L_3$ ,如图 5b 所示,由  $\Delta f = c/(2n\Delta L)$ ,得出

第一级,  $\Delta f = c/(2n\Delta l_1), \Delta l_1 = c/(2n\Delta f)$

第二级,  $2\Delta f = c/(2n\Delta l_2), \Delta l_2 = c/(4n\Delta f)$

第三级,  $4\Delta f = c/(2n\Delta l_3), \Delta l_3 = c/(8n\Delta f)$

通过设计每级滤波器的延迟线长度,可以将 8 个等间隔频率中的第 1 个和第 8 个选出,将其余的频率波段滤除,从而增大滤波器的自由频程 FSR.

#### (2) 串联型微波光子滤波器

图 6 IIR 和 FIR 级联的微波光子滤波器结构

图 6 是在传统意义上的微波光子滤波器后串联了 MZ 滤波器.同时,它也被定义为是有源结构和无源结构相结合的滤波器.由光纤光栅对和 EDFA 构成滤波器的有源部分, MZ 滤波器构成滤波器的无源部分.有源部分产生的频谱间隔为  $\Delta f$ ,经过 FIR 滤波器后,频谱间隔变为  $N\Delta f$ .因此,这种结构增加了滤波器的自由频程 FSR,进而  $Q$  值增加.文献中,作者已经可以使其  $Q$  值达到 801,但是,这种结构在设计时,必须根据需要的 FSR,严格设定 MZ 中每一段延迟线的长度,这就为系统的设计增加了复杂度.

这种级联结构可以大大增加微波光子滤波器的品质因数,并且给日后的研究提供很大的提示,多重结构串联的微波光子滤波器会成为日后的研究方向.

## 3 结 论

通过对微波光子滤波器的品质因数进行分析,得出了影响品质因数的关键因素,滤波器的抽头系数及增益对滤波器都是有影响的.增大微波光子滤波器的抽头系数和有源滤波器的增益,都可以增大

图 5 MZ 滤波器原理示意图

(下转第 49 页)

4℃,泵浦阈值随温度的变化.泵浦阈值随温度变化显著,主要是因为晶体的激光发射截面和量子效率随温度变化而变化<sup>[4]</sup>.

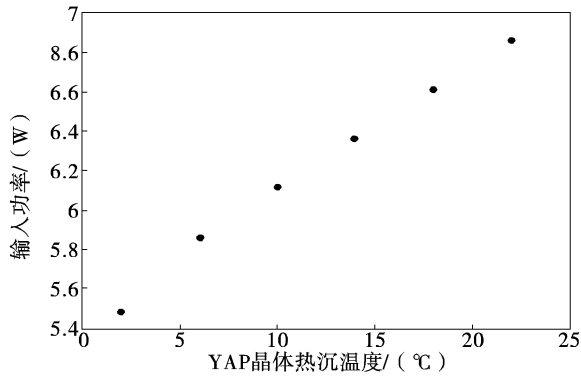


图 6 晶体热沉温度对泵浦阈值的影响

### 3 结 论

Tm:YAP 激光器在相同腔长时,采用平凹腔

(上接第 45 页)

Q 值.现阶段高 Q 值的微波光子滤波器研究日趋成熟,单一的有源或者无源滤波器已经不能满足需要,Q 值的提高势必需要新的理论研究作为指导.有源滤波器和无源滤波器,或者 IIR 与 FIR 滤波器的级联混合等结构较为复杂的滤波器会成为将来研究的主要热点.

#### 参考文献

- [1] Optimization of superstructured fiber Bragg gratings for microwave photonic filters response[J]. IEEE Photon. Technol. Lett, 2004, 16(7): 1736 - 1738.
- [2] Compact microwave photonic transversal filter with 40 - dB sidelobe suppression[J]. IEEE Photon. Technol. Lett, 2005, 17(3): 663 - 665.
- [3] Photonic signal processing of microwave signals using an active - fiber Bragg - grating - pair structure[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech, 1997, 45 (8): 1463 - 1466.
- [4] Tunable microwave photonic filter for noise and interfer-

( $R = -100$  mm) 输出功率最大, 获得 13.5 W 的 1.99  $\mu\text{m}$  激光, 光 - 光转换效率 28.2%, 斜效率高达 36%. 实验表明, 泵浦功率阈值随晶体热沉温度线性增加, 输出功率随晶体热沉温度线性减小.

#### 参考文献

- [1] RC Stoneman, LEsterowitz. Efficient 1.94  $\mu\text{m}$  Tm: YALO laser[J]. IEEE J. sel. Top. Quantum Electron, 1995 (1): 78 - 81.
- [2] 陆燕玲, 王俊, 孙宝德. 2  $\mu\text{m}$  波段激光晶体研究进展[J]. 无机材料学报, 2005, 20(5): 513 - 521.
- [3] Ian FElder, John Payne. Diode-pumped, room-temperature Tm: YAP laser[J]. Applied Optics, 1997, 36 (33): 20.
- [4] Thangavel Thevar, Norman PBarnes. Diode-Pumped, continuous - wave Tm: YALO3 laser[J]. Applied Optics, 2006, 45(14): 10.

ence suppression in UMTS base stations [J]. Electron Lett, 2004, 40(16): 1 - 2.

- [5] High - Q optical microwave filter[J]. Electron. Lett, 1999, 35(24): 2125 - 2126.
- [6] High - Q microwave photonic filter with a tuned modulator[J]. Opt. Lett, 2005, 30: 2299 - 1301.
- [7] A Novel High - Q Optical Microwave Processor Using Hybrid Delay - Line Filters[J]. IEEE Trans. Microw. Theory. Tech, 1999, 47(7).
- [8] High Q Microwave Filter Using Incoherent, Continuous - Wave Supercontinuum and Dispersion - Profiled Fiber[J]. IEEE Pho. Tech. Lett, 2007, 25(6).
- [9] Reflective Amplified Recirculating Delay Line Bandpass Filter[J]. IEEE Jour. Lightw. Tech, 2007, 25(6).
- [10] Continuously tunable photonic microwave filter based on a spatial light modulator. ScienceDirect.
- [11] Q value analysis of microwave photonic filters[J]. Front. Optoelectron. China, 2009, 2(3): 269 - 278.
- [12] 基于半导体光放大器的一阶 IIR 微波光子滤波器及其品质因素分析[J]. 物理学报, 2009, 58(2).

欢迎网上投稿 [www.gdjsyy.com](http://www.gdjsyy.com)